第 20 卷　第 3 期
2000 年 3 月

光　学　学　报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 20, No. 3
March, 2000

用空间图像融合技术进行三维重建的研究*

刘维一　王肇圻　母国光　方志良
(南开大学现代光学研究所 国家教委光学信息技术科学开放研究实验室，天津 300071)

摘　要　研究了从多个空间角度获得的三维物体图像的融合处理技术，并用于构成计算机三维重建时所需的表面纹理图。从光学成像系统获得的图像仅仅是三维物体在像平面上的投影，不能直接作为三维重建时的纹理图使用，必须消除由透视关系、几何投影关系等造成的畸变才能得到物体表面真实的纹理图。给出了反透视变换和逆几何投影变换所需的关系式，并将其用于真实物体三维重建时的表面纹理图的处理，得到了很好的结果。

关键词　图像融合，　三维重建，　图像处理。

1　引　　言

三维重建问题是当前十分活跃的一个领域。特别是虚拟现实造型语言(Virtual Reality Modeling Language)标准的建立，使得人们可以通过英特网进行三维浏览。用虚拟现实造型语言在计算机内构建虚拟的三维物体大体上要经过两个步骤[1]：首先构造出三维物体的结构；然后在三维结构表面粘贴纹理图。采用光学轮廓术可以获取物体的三维结构信息。这方面国内外已有许多的研究[2]。在此基础上如何获得物体的表面纹理图就成为迫切需要解决的问题。用光学成像系统得到的图像仅仅是三维物体在像平面上的投影图。由于存在空间透视变换关系和物体表面几何取向的不同，使得从光学成像系统得到的图像不能直接作为三维重建时的纹理图使用。本文采用空间图像融合技术对从不同空间角度获得的图像进行反透视变换和逆几何投影变换，从而得到物体表面真实的纹理图。再经过拼接处理及色调调整，最终获得完整的三维物体的表面纹理图。将它粘贴到由虚拟现实造型语言构造的三维结构的表面就得到虚拟的三维物体，并能通过网络随意地进行三维浏览。

2　空间图像融合处理

2.1　反透视变换

在光学成像系统获取的图像中，物体的大小服从透视关系。即对同样大小的物体，离成像系统光学中心越近，在图像中就越大；反之离光学中心越远，在图像中就越小。要得到物体表面真实的纹理图像必须消除透视关系造成的影响。

* 国家自然科学基金资助项目(批准号：69777003)。
收稿日期：1998-11-02

如图 1 所示，对高度同为 H 的物体 1 与物体 2，它们到成像系统光学中心的距离分别为 L_1 与 L_2。在像面上得到物体 1 的高度为 h_1；物体 2 的高度为 h_2。由于 L_1 与 L_2 不同($L_1 > L_2$)，在像平面上 h_1 与 h_2 的高度也不同($h_1 < h_2$)。由光学成像系统的物像关系可得到[3]

$$\frac{h_1}{H} = \frac{l}{L_1}, \qquad \frac{h_2}{H} = \frac{l}{L_2}.$$

所以

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{L_1}{L_2}. \tag{1}$$

对于任意物体的表面在空间坐标系中可描述为 $z = f(x, y)$。其中 x、y、z 分别为空间坐标系的三个基矢量方向。坐标原点选在物体的中心。z 轴指向成像系统的光轴。如图 2 所示，由空间坐标系的原点到成像系统光学中心的距离为 L。

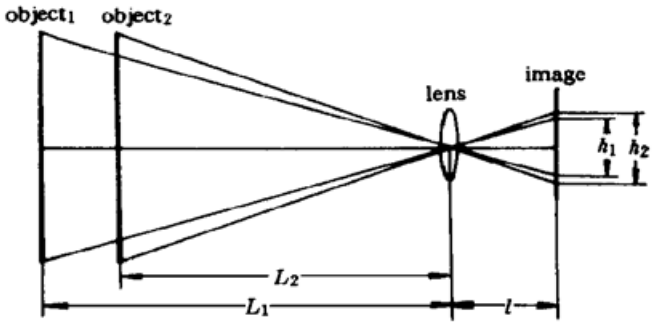

Fig. 1 Schematic diagram of relationship objects and their images

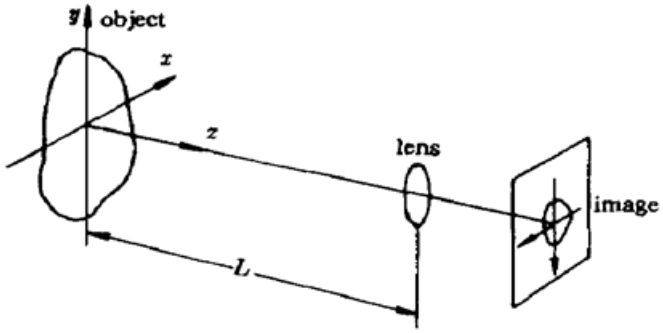

Fig. 2 Relationship between world coordinater and image plane coordinate

在像平面可得到物函数的投影函数 $F(\xi, \sigma)$。其中 ξ 和 σ 为像平面直角坐标系的基矢量方向。成像系统的横向放大率为 β，则可以得到 ξ、σ 与 x、y 之间的关系

$$x = \beta\xi, \qquad y = \beta\sigma.$$

由此，可以得到图像中的任意点到成像系统光学中心的距离

$$z = \sqrt{x^2 + y^2 + [L - f(x, y)]^2},$$

将其代入(1)式，同时使 h_1 为单位高度，则得到反透视变换因子 λ 为

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{(\beta\xi)^2 + (\beta\sigma)^2 + [L - f(\beta\xi, \beta\sigma)]^2}}, \tag{2}$$

只要知道 $z = f(x, y)$ 的函数关系，就可以消除透视关系造成的影响。

当成像系统的视场角不很大，同时又允许存在一定的误差时，可以忽略物体离轴造成的透视误差。这时(2)式可简化为

$$\lambda = \frac{L}{L - f(\beta\xi, \beta\sigma)}. \tag{3}$$

表 1 给出了允许误差与视场角的关系。

Table 1. Relationship between error limits and angle of vision field

error limits	angle of vision field/(°)
1%	16.2
5%	36.4
10%	51.6

2.2　逆几何投影变换

三维空间物体表面上任意一个小面元在空间的取向可以是任意方向。而光学成像系统只得到了它在 x 和 y 方向上的投影值。要得到物体表面真正的纹理图，必须消除由几何投影关系造成的影响。也就是要分别求出 x 方向与 y 方向的逆几何投影变换因子。

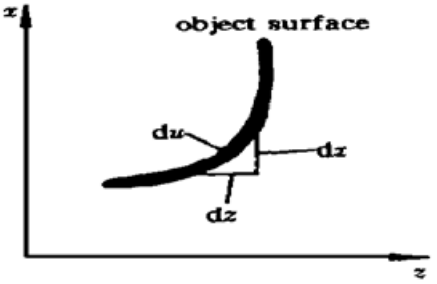

Fig. 3　Schematic diagram of projective surface unit

在物体表面 $z = f(x, y)$ 上取任意一个小面元 $ds = dudv$，在 $y = y_0$ 处可得到(如图 3 所示)

$$du = \sqrt{dx^2 + dz^2} = \sqrt{1 + \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right]^2}\, dx,$$

将 $x = \beta\xi$, $y = \beta\sigma$ 代入 $f(x, y)$ 即可得到 x 方向逆几何投影变换因子

$$u(\xi, \sigma) = \sqrt{1 + \left[\frac{\partial f(\beta\xi, \beta\sigma)}{\partial(\beta\xi)}\right]^2}. \tag{4}$$

同理可得到 y 方向逆几何投影变换因子

$$v(\xi, \sigma) = \sqrt{1 + \left[\frac{\partial f(\beta\xi, \beta\sigma)}{\partial(\beta\sigma)}\right]^2}. \tag{5}$$

在三维重建问题中，$z = f(x, y)$ 是已知函数。对简单几何体，$f(x, y)$ 可以给出解析式。对于任意形状的几何体则需要用光学轮廓术测量出表面形状，再分别求出 x 和 y 方向的导数，以便得到逆几何投影变换因子。

2.3　色调调整

从不同空间角度获得的图像之间在色调上存在一定的差异。所以，色调调整是空间图像融合过程不可缺少的重要步骤。

2.3.1　彩色空间变换

用彩色 CCD 获取的图像是 RGB(红绿蓝) 模式。由于 RGB 空间用红，绿，蓝三原色的混合比例定义不同的色彩，三个分量之间不能独立变化。在进行色调调整时如果对三个分量分别进行调整则很容易偏色。特别是当画面以某一色调为主，其它颜色很少时，偏色现象更加严重。

HIS 模式是另一种彩色空间模型[4]。它基于视觉原理定义了三个独立的颜色心理属性：明度(I)，色调(H)，饱和度(S)。由于 HIS 空间三个分量具有相对独立性，可分别对他们进行调整。

由 RGB 空间到 HIS 空间的变换关系为

$$I = (R + G + B)/3;$$

$$\left.\begin{array}{lll} \mathrm{Min}(R, G, B) = B \text{ 时:} & H = \dfrac{G - B}{3(I - B)}, & S = 1 - \dfrac{B}{I}; \\ \mathrm{Min}(R, G, B) = R \text{ 时:} & H = \dfrac{B - R}{3(I - R)} + 1, & S = 1 - \dfrac{R}{I}; \\ \mathrm{Min}(R, G, B) = G \text{ 时:} & H = \dfrac{R - G}{3(I - G)} + 2, & S = 1 - \dfrac{G}{I}. \end{array}\right\} \tag{6}$$

其中 $\mathrm{Min}(R, G, B) = B$ 表示 RGB 三个变量中 B 值最小。

由 HIS 空间到 RGB 空间的变换关系为

$$\begin{aligned}
&0 \leqslant H < 1, \quad R = I(1 + 2S - 3HS), \quad G = I(1 - S + 3HS), \quad B = I(1 - S);\\
&1 \leqslant H < 2, \quad G = I(1 + 5S - 3HS), \quad B = I(1 - 4S + 3HS), \quad R = I(1 - S);\\
&2 \leqslant H < 3, \quad B = I(1 + 8S - 3HS), \quad R = I(1 - 7S + 3HS), \quad G = I(1 - S).
\end{aligned} \tag{7}$$

有了这些变换关系，就可将 RGB 空间转换成 HIS 空间。然后对三个独立的变量分别进行调整。最后再将 HIS 空间还原成 RGB 空间，得到调整后的 RGB 图像。

2.3.2 分量调整

如果要进行调整的两幅图像分别为 $f(\xi, \sigma)$ 和 $g(\xi, \sigma)$，其中 ξ、σ 为图像上每个像元的采样坐标。希望将图像 $f(\xi, \sigma)$ 的色调调整到与图像 $g(\xi, \sigma)$ 一致。为此定义 α 为 $f(\xi, \sigma)$ 相对 $g(\xi, \sigma)$ 的增益变化；γ 为 $f(\xi, \sigma)$ 相对 $g(\xi, \sigma)$ 的零点漂移量。这样色调调整问题归结为求解 α 与 γ 的问题[5]。

为使调整后两幅图像的差别达到最小，应使两幅图像的方差值达到最小，使泛函

$$W = \iint [\alpha f(\xi, \sigma) + \gamma - g(\xi, \sigma)]^2 \, \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\sigma$$

为最小。令

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0, \qquad \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0,$$

得到

$$\alpha = \frac{\iint [g(\xi, \sigma) - M_g][f(\xi, \sigma) - M_f] \, \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\sigma}{\iint f(\xi, \sigma) M_f^2 \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\sigma}, \tag{8}$$

$$\gamma = M_g - \alpha M_f, \tag{9}$$

其中

$$M_f = \frac{1}{A} \iint_A f(\xi, \sigma) \, \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\sigma,$$

$$M_g = \frac{1}{A} \iint_A g(\xi, \sigma) \, \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\sigma,$$

A 是图像的面积，M_f 和 M_g 正好是图像灰度的平均值。调整后的图像 $f'(x, y)$ 可表示为

$$f'(\xi, \sigma) = \alpha f(\xi, \sigma) + \gamma, \tag{10}$$

以上过程只是对 HIS 色彩空间中的一个分量进行的调整。如果需要对三个分量进行调整，则要对各个分量分别重复以上过程。

3 实验过程与结果

3.1 背景去除

由光学系统获得的图像进行融合处理前必须将背景去除。单纯用软件的方法去除背景很难保证边缘提取的准确性。因为物体表面的纹理变化是多种多样的，对软件处理来说都构成强烈的干扰。然而，用光学照明的方法则可以很容易将背景与物体分离开，并使边缘清晰准确。在实验中用两个 300 W 的溴钨灯作背景照明光源，两个 150 W 的溴钨灯作前景照明光源。背景与物的距离为 40 cm。当只用背景光照明时，即使是白色的物体也能得到鲜明准确

的外形轮廓。在此基础上用软件处理就变得容易而且准确。不会受到纹理的干扰。

3.2　图像的融合处理

实验中用一个小喷漆桶作为三维重建的对象。小桶中心到 CCD 镜头光学中心的距离为 $L = 595$ mm，小桶的直径为 $D = 33$ mm，高 205 mm。由于视场角不很大，反透视变换因子可用(3)式，其中 $z = \sqrt{D^2 - x^2} = \sqrt{D^2 - (\beta\xi)^2}$。实验中 $\beta = 0.45$ mm/pixel。反透视变换因子为

$$\lambda = \frac{L}{L - \sqrt{D^2 - (\beta\xi)^2}},$$

图 4(a) 是用 CCD 摄像机直接获得的实验用小喷漆桶的外形照片。图 4(b) 是经过反透视变换后的图像。反透视变换前，小桶的上下边缘为圆弧型；经过反透视变换后，上下边缘为直线。

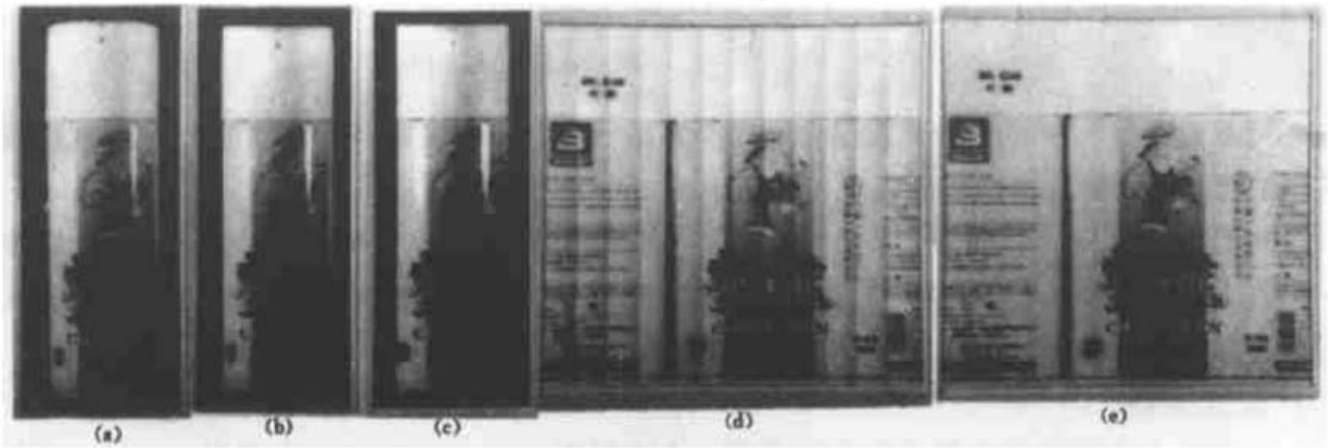

Fig. 4 (a) The object image from CCD camera, (b) The object image after anti-perspective adjustment, (c) The object image after anti-geometry adjustment, (d) The results of surface texture image without hue adjustment, (e) The final result of surface texture image

将 $z = \sqrt{D^2 - x^2} = \sqrt{D^2 - (\beta\xi)^2}$ 代入(4)式即可得到逆几何投影变换因子为

$$\mu = \sqrt{\frac{D^2}{D^2 - x^2}} = \sqrt{\frac{D^2}{D^2 - (\beta\xi)^2}},$$

由于圆柱体沿 y 方向为直线，所以 $v = 1$。这里应当注意，当 $x = D$ 时，μ 为无穷大。在图像中对应着小桶的边缘水平方向表面纹理的分辨力为零。只有中心部分具有较高的分辨力。所以逆几何投影变换只能在中部区域进行。实验中在 $x = \pm(\sqrt{3}/2)D$ 范围内进行逆几何投影变换，这时 μ 在 1 至 2 之间。超出这一范围，水平方向分辨力将急剧下降。图 4(c) 是经过逆几何投影变换后的图像。在逆几何投影变换前，小桶左下角的圆形标签为椭圆形，经过逆几何投影变换标签为圆形。

由于摄取图像时光照条件基本保持不变，得到的图像色调基本上是一致的，只对亮度 (I) 进行调整即可得到满意的效果。需要注意的是，物体左右两侧的灯光不可能做到完全一致，所以在水平方向亮度是渐变的。图 4(d) 是未经过水平方向亮度调整的拼接图。为了使同一幅图像的亮度均匀一致，要从相邻图像的重叠部分由(8)式求得调整因子 α，并使 α 因子沿水平方向衰减，直至图像的另一端衰减为 1。这时亮度调整因子 α_ξ 的表达式为

$$\alpha_\xi = \frac{(\xi - \xi_a) + (\xi_b - \xi)\alpha_0}{\xi_b - \xi},$$

其中 ξ_a、ξ_b 分别为图像左右端点的位置。图 4(e) 是经过水平方向色调调整后的拼接图。在整

幅图像中色调基本保持一致。

3.3 图像的拼接

实验中用于三维重建的物体放在旋转平台上，用CCD摄取其表面图像。为了保证图像拼接产生的误差在一个像素以内，要求转台有足够高的精度。下面对旋转平台的精度进行分析:

以圆柱体为例，圆柱体的半径为 r，它在图像中占500个像素列，在圆柱体中心分辨力最高处每个像素所对应的角度为

$$d\theta = \frac{2r/500}{r} = 4 \times 10^{-3}(\mathrm{rad}).$$

旋转平台由60∶1的机械变速装置组成。其中主动轮的直径为90 mm。如果主动轮的边缘刻度产生±0.5 mm的误差，则对应于转动平台产生的误差为

$$\delta\phi = \frac{0.5/45}{60} = 1.85 \times 10^{-4}(\mathrm{rad}).$$

由此可见，转动平台产生的误差仅为一个像素的十分之一。这样在图像拼接时可以直接截取所需的像素，而精度控制在误差范围以内。

为了得到较高的分辨力，实验中每间隔30°用CCD摄像机采集一幅图像，并且只取小桶中心的图像进行拼接处理。图4(e)是经过融合处理后拼接成的小喷漆桶的外观纹理图。从中可以看到以上的处理可以获得物体表面真实的纹理图。

3.4 三维重建

实验用小喷漆桶的几何结构为圆柱体，在虚拟现实造型语言标准中可用Cylinder语句构造出它的几何结构。将得到的小桶表面纹理图图4(e)粘贴到圆柱体的表面。此外，还要摄取小桶顶部和底部的纹理图，并粘贴到相应的表面上。如此便完成了小喷漆桶的三维重建。通过网络可对其进行三维浏览。

结 论 用虚拟现实造型语言标准对真实物体进行三维重建时，既要得到物体的三维结构，又要获取表面纹理图。由光学成像系统获得的图像不能直接作为纹理图使用，要经过反透视变换、逆几何投影变换、色调调整等步骤来恢复物体表面真实的纹理，并在此基础上，把从不同空间角度获得的图像拼接成完整的表面纹理图。用本文给出的反透视变换因子和逆几何投影变换因子对图像进行局部缩放调整得到了物体表面真实的纹理图，并将从不同空间获得的纹理图经色调调整后拼接成完整的表面纹理图。用虚拟现实造型语言标准在计算机内按原物体的比例构建出三维结构，将纹理图粘贴到三维结构的表面，得到了真实物体的三维虚拟重建。通过计算机网络可对重建的三维物体随意地进行三维浏览。

光学方法与计算机相结合可以互相取长补短。有些问题单纯靠计算机软件来完成是比较困难的。用光学手段提供给计算机很好的图像可使软件处理起来速度更快，可靠性更高。通过调整背景光照明使得物体轮廓清晰，并且不受表面纹理的干扰。对图像的拼接问题，仅采用一个简单的机械装置就把误差控制在精度范围以内。不仅精度高，处理速度快，而且在软件处理过程中不需任何人工干预，完全由计算机自动完成。得到了很好的结果。

参 考 文 献

[1] Ames A L, Nadeau D R, Moreland J L. *VRML 2.0 Sourcebook*, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997.

[2] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108

[3] 母国光, 战元龄. 光学. 北京: 高等教育出版社, 1987.

[4] Grasso D N. Applications of the HIS color transformation for 1∶2400-scale geologic mapping: A low cost spot alternative. *Photogrammetric Engineering & Romote Sensing*, 1993, **59**(1): 73~80

[5] 许殿元, 丁树柏. 遥感图像信息处理. 北京: 宇航出版社, 1990.

Three-Dimension Reconstruction by Space Image Fusion

Liu Weiyi　Wang Zhaoqi　Mu Guoguang　Fang Zhiliang

(*Institute of Modern Optics, Nankai University,*
Optical Information Science Laboratory, SEC,
China, Tianjin 300071)

(Received 2 November 1998)

Abstract It can be got that the texture image of three-dimension object by fusion processing of a series of two-dimension images and paste it on the surface of three-dimension structure that is constructed by computer. The images, which are got from optical system, cannot be used as texture image of three-dimension reconstruction. To remove the distortion caused by perspective and geometry projection is needed. The anti-perspective and anti-geometry projection equations are derived, and the experimental results are satisfied.

Key words image fusion, three-dimension reconstruction, image processing.